

Demostradores de los módulos posteriores de 44 GHz para la misión Planck.

Eduardo Artal, Beatriz Aja, M^a Luisa de la Fuente, Juan P. Pascual, Angel Mediavilla

Departamento de Ingeniería de Comunicaciones

Universidad de Cantabria

e-mail : artale@unican.es

Abstract- This communication deals with the implemented assemblies and characterisation test results of several Back End Modules at 44 GHz for the Planck Mission of the European Space Agency (ESA), which are low noise and broadband (20%) receivers having direct conversion to DC. They are parts of the 44 GHz radiometers. In order to perform integration tests, before the integration of Flight Model units, some representative demonstrators have been manufactured and tested. These demonstrators will be integrated in Jodrell Bank Observatory (Manchester, England) with the Front End Modules made there. Main magnitudes tested are effective bandwidth, RF to DC response, noise temperature, linearity, input matching, video bandwidth and knee frequency of low frequency 1/f noise at the output.

I. INTRODUCCIÓN

Los módulos posteriores de 44 GHz para la misión Planck de la Agencia Europea del Espacio (ESA) son receptores de bajo ruido y banda ancha (20%), con conversión directa a corriente continua. Para realizar pruebas de integración, previas a las de los modelos de vuelo, se han fabricado y medido unos demostradores representativos, que se integrarán en el Observatorio Radioastronómico de Jodrell Bank (Manchester, Inglaterra) con los módulos frontales que allí se desarrollan. Aunque la integración final de los equipos de vuelo, se realiza en Alenia-Spazio (antes Laben) en Milán (Italia), la caracterización de algunas magnitudes de los módulos frontales requiere la conexión con los módulos posteriores, de ahí la conveniencia de disponer de demostradores representativos de los modelos de vuelo, es decir de los que se enviarán en el satélite.

II. DIAGRAMA DE BLOQUES

Cada uno de los radiómetros de la misión Planck [1] sigue el diagrama de bloques de la Fig. 1. Los radiómetros de Planck se usarán para obtener mapas de la radiación cósmica de fondo de microondas de toda la esfera celeste. Se trata de un radiómetro diferencial, también llamado de pseudo-correlación, que permite cancelar en gran medida el ruido de tipo 1/f de baja frecuencia, a la vez que durante todo el tiempo se está observando y midiendo la señal que llega desde el Cielo. El módulo frontal (FEM) lleva amplificadores de bajo ruido enfriados a 20 K, idealmente idénticos en su respuesta de amplitud y fase, para reducir al

máximo el ruido añadido. Los desfases conmutados son de 180°, de forma que el desfase de ambos puede ser idéntico o diferir en los 180°. Con esta condición, en el segundo híbrido, una salida dará una señal proporcional a la temperatura del cielo y a la otra a la Carga de Referencia.

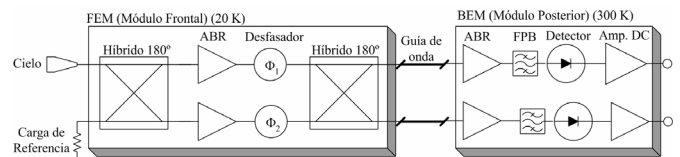


Fig. 1. Diagrama de bloques de un radiómetro de Planck.

El módulo posterior (BEM) tiene como cometido el amplificar más la señal, para que se pueda detectar mediante un diodo Schottky. Los amplificadores son de bajo ruido operando a temperatura ambiente. Además el BEM debe fijar el ancho de banda mediante un filtro paso banda (FPB). La señal se convierte directamente a corriente continua con un detector basado en diodos Schottky sin polarizar. Los amplificadores de DC que siguen al diodo detector son para elevar el nivel de la señal detectada y al sistema de adquisición que hay tras cada BEM. La conexión entre el módulo frontal (FEM) y el módulo posterior (BEM) se realiza por medio de guías de onda rectangulares, de longitud superior a un metro, con etapas de aislamiento térmico entre ambos.

La ventaja de usar dos ramas en el módulo frontal viene de que tanto la señal del cielo como la de referencia pasan por las dos, contaminándose ambas señales con el mismo ruido añadido, por lo que éste puede, en principio, eliminarse mediante un adecuado post-procesado de la señal a la salida del radiómetro. Cualquier receptor que se construya, por muy bueno que sea, siempre tendrá una temperatura de ruido mayor que la temperatura que se desea medir, que está en torno a los 2.7 K. Por lo tanto la salida contiene mucho más ruido que señal. La única forma de eliminar el ruido es hacer muchos promedios temporales de la señal recibida. El ruido de tipo 1/f no puede eliminarse por promediado, por lo que debe cancelarse por otros métodos. Las fluctuaciones de ganancia y ruido en los módulos posteriores, que darán lugar a un espectro de ruido 1/f, se cancelarán debido a la velocidad de los conmutadores de fase en el módulo frontal.

III. MÓDULOS DE RF Y MÓDULOS DE RF-DC.

Cuando el radiómetro está totalmente integrado, no es posible tomar medidas de la señal de microondas que hay a la entrada del detector, y complica su caracterización en radiofrecuencia. Por ejemplo, no es posible conocer la temperatura de ruido en función de la frecuencia. Por ese motivo se decidió fabricar dos ramas del BEM con sólo las etapas de RF y otras dos ramas del BEM incluyendo la cadena de RF y detección a DC.

A diferencia del módulo frontal (FEM) donde las dos ramas están en el interior de una estructura equilibrada, siendo por lo tanto interdependientes, en el módulo posterior las ramas son totalmente independientes. Para facilitar el montaje y las conexiones posteriores se decidió fabricar las ramas totalmente separadas.

A. Ramas de RF.

Una rama de RF está compuesta por los siguientes subsistemas:

- Transición de guía rectangular (WR-22) a microstrip.
- Amplificador MMIC, proceso ED02AH de OMMIC con transistores Normally-On.
- Atenuador resistivo de banda ancha (5 dB).
- Amplificador MMIC, proceso ED02AH de OMMIC con transistores Normally-Off.
- Atenuador resistivo de banda ancha (13 dB).
- Filtro paso-banda de líneas acopladas.[2].
- Transición de microstrip a guía rectangular (WR-22).

La transición guía rectangular a microstrip está construida con varias secciones de guía "ridge" de un cuarto de longitud de onda [3]. Tiene carácter de banda ancha y bajas pérdidas. La última sección "ridge" tiene 50 Ohm de impedancia, y se conecta a una línea microstrip construida sobre Alúmina (constante dieléctrica 9.9 y 0.254 mm de grosor).

Los dos amplificadores MMIC son de diseño propio [4],[5], usando tecnología PHEMT de AsGa del proceso ED02AH de OMMIC. Cada uno de ellos tiene más de 20 dB de ganancia en la banda de 39.6 a 48.4 GHz. Se realizaron varias versiones de amplificadores MMIC para esta aplicación. Se eligió como mejor configuración la de un primer MMIC con transistores "Normally-On" (deplexión), que proporcionaba buen comportamiento de ruido y tenía mejor adaptación de entrada que el segundo. Para este segundo se eligió un MMIC con transistores "Normally-Off", con ganancia bastante plana en la banda y que requería menor consumo de potencia para su polarización además de tener mejor adaptación de salida que el primero.

La planitud de la ganancia en la banda es un parámetro bastante crítico, ya que de ella depende el conseguir o no el ancho de banda efectivo requerido. La desadaptación entre etapas juega un papel muy importante en el rizado de la ganancia. Por este motivo se han incluido atenuadores resistivos de banda ancha [6], que mejoran la respuesta en la banda y además adecuan la ganancia de cada rama a los niveles especificados en el radiómetro. Los atenuadores

usados finalmente tienen una atenuación más elevada que los utilizados en la versión previa, Modelo de Calificación (QM), debido a un último cambio en las especificaciones impuesto por los responsables técnicos del consorcio Planck. Para conseguir planitud de la ganancia no es necesario poner tanta atenuación (13 dB) a la salida del segundo MMIC.

B. Ramas de RF-DC.

En las ramas de RF-DC además de los subsistemas indicados en el apartado anterior, están añadidos los siguientes:

- Detector con diodo Schottky.
- Amplificador de DC, con salida equilibrada.

La Fig. 2 muestra una fotografía de la parte de radiofrecuencia, incluido el detector, de una de las ramas de RF-DC construidas.

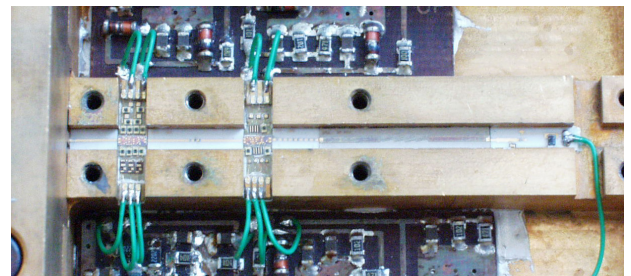


Fig. 2. Circuitos de RF de una rama RF-DC.

La ganancia del amplificador de DC se ha elegido de forma que se obtenga el nivel de señal de salida especificado, en el margen de 0.2 a 0.8 Volt para 20 K de temperatura del cielo, cuando se tiene una rama del radiómetro completo. Otro criterio a considerar para la ganancia es que el ancho de banda de video del amplificador de DC sea al menos de 50 KHz.

En la Fig. 3 se muestra el aspecto externo de una rama de RF-DC. El circuito impreso, en sustrato FR4, contiene el amplificador de DC y las redes de polarización de continua de todos los subsistemas.

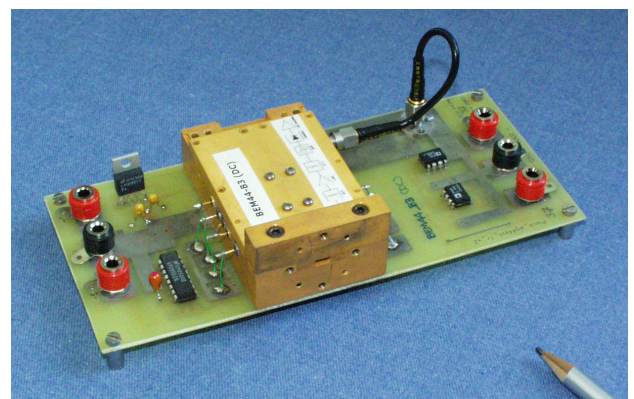


Fig. 3. Rama de RF-DC de 44 GHz.

IV. RESULTADOS EXPERIMENTALES

Se han caracterizado las cuatro ramas del demostrador del BEM de 44 GHz. A continuación se describen las magnitudes más relevantes.

A. Ganancia y Cifra de ruido.

La ganancia de RF y la cifra de ruido de las dos ramas de RF son las mostradas en la Fig. 4. En ambas ramas la ganancia es mayor de 20 dB en la banda de 39.6 a 48.4 GHz, y un ancho de banda efectivo [7] de 8.8 GHz.

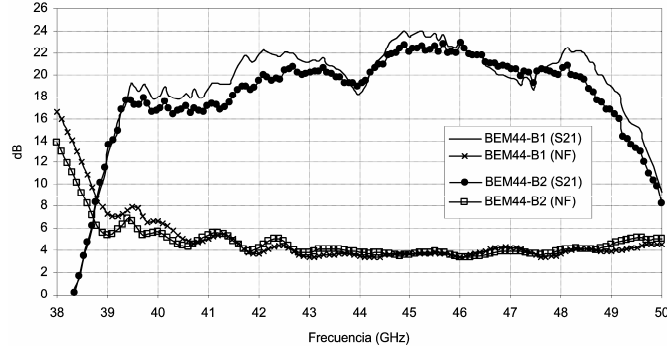


Fig. 4. Ganancia y cifra de ruido de las ramas de RF.

La cifra de ruido media en la banda es menor de 5 dB en las dos ramas (BEM44-B1 y BEM44-B2).

B. Respuesta RF a DC. Linealidad.

Las ramas con detector incluido se han caracterizado conectando un generador de barrido a la entrada, con una potencia disponible de -50 dBm. La respuesta de las dos ramas se muestra en la Fig. 5.

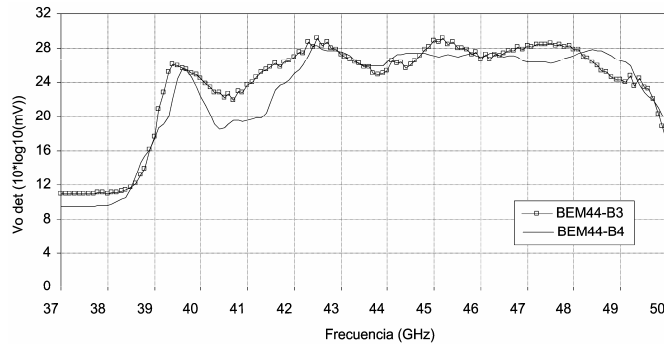


Fig. 5. Respuesta de RF a DC de las ramas de DC.

A partir de estas medidas se calculó el ancho de banda efectivo del radiómetro, obteniéndose 9.2 GHz para la rama BEM44-B3 y 8.9 GHz para la rama BEM44-B4. La linealidad de las ramas del BEM se caracterizó con la medida del punto de compresión de 1 dB de la ganancia, cuando se varía la potencia de una señal de 44 GHz a la entrada. El valor de potencia de entrada para 1 dB de compresión fue de -48 dBm. Tanto los valores de ancho de banda efectivo como los de linealidad cumplen las especificaciones de los radiómetros de Planck: ancho de banda efectivo del 20% (8.8 GHz) y potencia de entrada para 1 dB de compresión mayor o igual que -55 dBm a la frecuencia central de la banda.

C. Comportamiento en temperatura

Un aspecto importante en los módulos posteriores de Planck es la susceptibilidad de su respuesta respecto a la temperatura. Se caracterizó la respuesta de las ramas de RF-DC en el margen de -30 °C a +17 °C, en una cámara climática conectando externamente un generador de barrido.

La Fig. 6 muestra las variaciones de la respuesta RF-DC a distintas temperaturas del BEM44-B3.

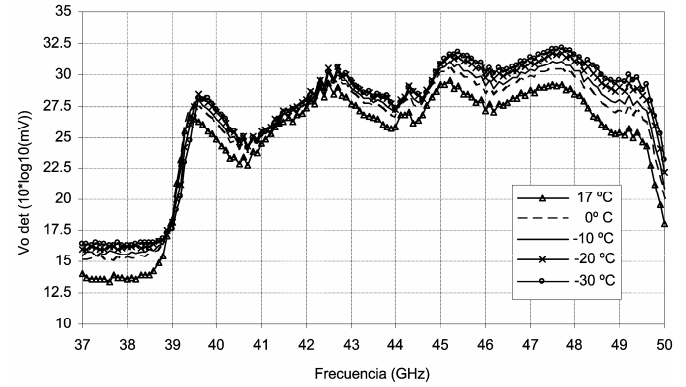


Fig. 6. Respuesta RF-DC a distintas temperaturas

Para las medidas de la respuesta RF-DC a diferentes temperaturas, se ha calculado el ancho de banda efectivo en las dos ramas y los resultados fueron los de la Tabla 1.

Tabla 1. Anchos de banda efectivo para diferentes temperaturas

T ^a (°C)	BWef (GHz) BEM44-B3	BWef (GHz) BEM44-B4
-30	8.8	8.7
-20	9.0	8.8
-10	9.2	8.9
0	9.3	9.0
+17	9.2	8.9

D. Temperatura de ruido y factor Y.

La temperatura de ruido de las ramas de RF se obtuvo de las medidas de cifra de ruido, realizadas en barrido de frecuencia, Fig. 4. También se comprobó su valor medio mediante el factor Y usando medidas de potencia. La medida de ruido en las ramas de DC solamente se puede realizar mediante el factor Y a través de las tensiones detectadas a la salida. Según la ecuación (1) el factor Y es la relación de las tensiones de salida V_h y V_c para la fuente de ruido en “On” y “Off” respectivamente.

$$Y = \frac{V_h}{V_c} \quad (1)$$

Según la ecuación (2), se obtiene la temperatura equivalente de ruido T_e conociendo la cifra de ruido F , la cual a su vez se calcula a partir de la relación de ruido en exceso (Excess Noise Ratio = ENR) de la fuente de ruido y del factor Y.

$$F = \frac{ENR}{Y-1} \Rightarrow T_e = T_0 \cdot (F-1) \quad (2)$$

En las ramas de RF se obtuvo, mediante medidas de potencia unos factores Y de 4.33 y 4.7, que corresponden a unas cifras de ruido de 5.1 y 4.5 dB respectivamente. A partir de las medidas de ruido en función de la frecuencia, se puede obtener, teniendo en cuenta la ganancia, una cifra de ruido

media aplicando la ecuación (3). Los valores que se obtuvieron fueron 4.9 y 4.51 dB, que concuerdan con los resultados a partir del factor Y.

$$F = \frac{\sum_{i=1}^N G_i \cdot F_i}{\sum_{i=1}^N G_i} \quad (3)$$

El problema para poder obtener la medida de temperatura de ruido por este método, en los módulos RF-DC, es que la ganancia de RF del BEM es demasiado baja para proporcionar una potencia mayor que la sensibilidad tangencial del diodo detector. Los factores Y medidos serán siempre menores que los reales y por tanto las temperaturas de ruido calculadas serán pesimistas.

E. Ruido 1/f y frecuencia de codo

La densidad espectral de la señal de salida permite comprobar la existencia de ruido de tipo 1/f en baja frecuencia. Las medidas, realizadas con un Analizador Vectorial de Señal, dieron como resultado que la frecuencia de codo está por debajo de 10 Hz, cumpliéndose bien la especificación de ser menor que 1 KHz. La Fig. 7 muestra el espectro de ruido 1/f a la salida de la rama BEM44-B3, cuando a la entrada hay una carga a temperatura ambiente.

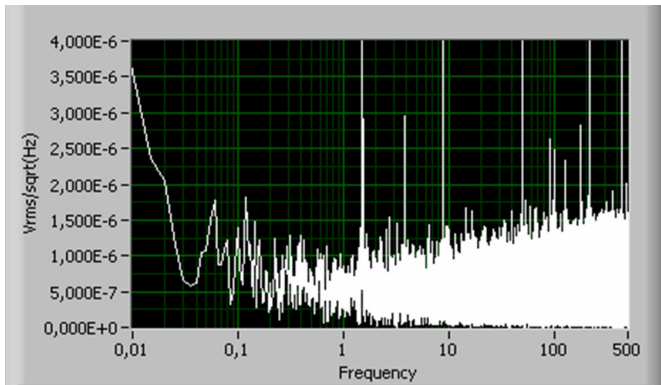


Fig. 7. Densidad espectral de ruido a la salida de la rama BEM44-B3

V. CONCLUSIONES

Se han construido y caracterizado cuatro ramas del demostrador del módulo posterior de los radiómetros de 44 GHz de la misión Planck. Dos de las ramas contienen los subsistemas de microondas sin detección, y las otras dos ramas tienen integradas las partes de radiofrecuencia y de detección y amplificación de continua. Se han caracterizado sus magnitudes más importantes de cara a su integración con los módulos frontales, obteniéndose resultados satisfactorios y muy similares entre sí.

AGRADECIMIENTOS

La fabricación y montaje de los circuitos han sido realizados por Alexandrina Pana y Eva Cuerno. Los detectores a diodo y los amplificadores de continua se han diseñado en la Universidad Politécnica de Cataluña. Este trabajo se ha realizado gracias a la financiación del Programa Nacional de Espacio del Plan Nacional de I+D+I, con las ayudas de referencia ESP2002-04141-C03-03 y ESP2004-07067-C03-02 de los Ministerios de Ciencia y Tecnología y de Educación y Ciencia respectivamente.

REFERENCIAS

- [1] E. Artal, B. Aja, M.L. de la Fuente, N. Roddis, D. Kettle, F. Winder, L. Pradell, P. De Paco, "Radiometers at 30 and 44 GHz for the Planck mission", Microwave Technology and Techniques Workshop, 8-9 October 2002, ESA-ESTEC, Noordwijk, The Netherlands. Proceedings WPP-203, pp 41-48.
- [2] M. Dettratti, B. Aja, J.P. Pascual, M.L. de la Fuente, E. Artal, "Millimeter wave microstrip broadband bandpass filters design and test", 32nd European Microwave Conference, Milan 23-27 September 2002, Conference Proceedings Vol. 2, pp 573-575.
- [3] W. Hoefer, M. Burton, "Closed-Form Expressions for the Parameters of Finned and Ridged Waveguides", *IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques*, vol. MTT-30, pp 2190-2194, December 1982.
- [4] B. Aja, M.L. de la Fuente, J.P. Pascual, A. Mediavilla, E. Artal, "Low noise monolithic Ka-Band P-HEMT amplifier for space applications", GAAS 2001, 9th European gallium Arsenide and other semiconductors Application Symposium, London 24-25 September 2001, Conference Proceedings pp 85-88.
- [5] B. Aja, M.L. de la Fuente, J.P. Pascual, J.P. Cryan, E. Artal, "Amplificadores MMIC bajo ruido en la banda Q utilizando transistores de enriquecimiento y de depleción", Actas del XVII Simposium Nacional de URSI, Alcalá de Henares, 11-13 septiembre 2002, pp 63-64.
- [6] B. Aja, L. de la Fuente, J. P. Pascual, E. Artal, "Técnica de mejora del ancho de banda efectivo en el módulo posterior del radiómetro Planck", Actas y CD del XIX Simposium Nacional de URSI, Barcelona, 8-10 septiembre 2004.
- [7] M.E. Tiuri, "Radio Astronomy Receivers", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 12, issue 7, pp. 930-938, Dec. 1964.